



TITLE:

2次元フェルミオン系の帯磁率に対する
相関効果(スピン三重項超伝導
をめぐって)

AUTHOR(S):

高橋, 英昭; 平島, 大

CITATION:

高橋, 英昭 ...[et al]. 2次元フェルミオン系の帯磁率に対する相関効果(ス
ピン三重項超伝導をめぐって). 物性研究 1997, 68(6): 790-793

ISSUE DATE:

1997-09-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/96137>

RIGHT:

2次元フェルミオン系の帯磁率に対する相関効果

筑波大 物理 高橋 英昭

平島 大

§1 はじめに

パラマグノン理論 [1] において静的近似を行なうと、準粒子間有効相互作用は静的帯磁率 $\chi_s(q)$ によって表される。とくに、フェルミ面上での2粒子間の相互作用は波数領域 $0 \leq q \leq 2k_f$ の $\chi_s(q)$ によって表される。帯磁率 $\chi_s(q)$ が強磁性的であるとき、即ち、 $q=0$ で極大値をもつとき、有効相互作用の p 波の成分が引力となることが知られている。3次元液体³Heでは、実際、このメカニズムによって p 波超流動が実現していると考えられている。自由空間中の3次元フェルミ粒子系では、相互作用がないときに既に帯磁率は強磁性的であり乱雑位相近似 (RPA) でもこのことは同様である。

それに対して、2次元では、相互作用がないとき、温度 $T=0$ における帯磁率 $\chi_s(q)$ は $0 \leq q \leq 2k_f$ で一定である。この事情は RPA を用いてもかわらない。そのため、RPA による帯磁率を用いて計算すると、フェルミ面上の2粒子間には、 s 波の斥力以外の相互作用は働かないという結論が得られる。実際には RPA で取り入れられていない相関効果によって、帯磁率 $\chi_s(q)$ は $0 \leq q \leq 2k_f$ で波数依存性をもつようになり、この波数依存性がどの角運動量成分の引力の成分が最も強くなるか決定するのにきわめて重要になると考えられる。

本研究の目的は、自由空間中の2次元フェルミオン粒子系の帯磁率 $\chi_s(q)$ に対する相関効果を調べ、それによって帯磁率 $\chi_s(q)$ がどのような波数依存性をもつようになるのか明らかにし、さらに、スピンゆらぎを媒介とした相互作用のうちどの角運動量成分が最も引力的となるかを明らかにすることである。

§2 モデル、計算方法

計算は2次元正方格子上的ハバードモデルを用いて行なった。これは、格子上のモデルであるが希薄極限を考えることによって、格子の影響を十分に小さくすることができる。また相関効果を考慮するために、いわゆる、Conserving approximations [2] といわれるタイプの近似法 (RPA はこのうちの最も簡単な例である) を用いる。この方法では、1粒子 Green 関数 G と相互作用 U を用いて “free-energy” $\Phi[G]$ を G の汎関数として

仮定する。次に $\Phi[G]$ を用いて、1粒子 Green 関数 G と応答関数を自己無撞着に解く。本研究では、 $\Phi[G]$ として、2通りの選び方をする。

(A) すべての particle-particle 散乱過程を取り入れる；

(B) すべての particle-hole 散乱過程を取り入れる。

(A) および (B) の寄与を両方とも取り入れた計算は、ゆらぎ交換近似 (fluctuation-exchange approximation) と呼ばれている [3]。以下では、簡単のため (A) による近似を particle-particle 型理論、(B) による近似を particle-hole 型理論と呼ぶことにする。(ただし、我々の計算では簡単のため、帯磁率の計算において Aslamasov-Larkin 型のダイアグラム [4] を省略した。)

次にスピンゆらぎを媒介とする準粒子間有効相互作用を示す。(1) 静的近似 (2) 波動関数くり込み因子の省略 (3) vertex 補正の省略、以上を行なうと RPA に基づくパラマグノン理論による表式と形式的には同一の式が得られる。

Cooper channel の準粒子間有効相互作用を $v_t(\mathbf{k}, \mathbf{k}')$ (triplet channel)、 $v_s(\mathbf{k}, \mathbf{k}')$ (singlet channel) とすると、

$$\begin{cases} v_t(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = -\frac{U^2}{8} [\chi_s(\mathbf{k} - \mathbf{k}') - \chi_s(\mathbf{k} + \mathbf{k}')], \\ v_s(\mathbf{k}, \mathbf{k}') = \frac{3U}{2} + \frac{3U^2}{8} [\chi_s(\mathbf{k} - \mathbf{k}') + \chi_s(\mathbf{k} + \mathbf{k}')]. \end{cases} \quad (1)$$

と表される。

§3 計算結果

静的帯磁率 $\chi_s(q)$ の波数依存性についての結果を示す。我々の計算では、隣接サイト間の飛びうつり積分 t をエネルギーの単位とし、粒子数密度 n を $n = 0.1$ 、温度 T を $T = 0.1$ 、格子サイズを 32×32 として計算を行なった。この単位ではかると、相互作用がない場合、粒子数密度 $n = 0.1$ のときのフェルミエネルギー ϵ_f は、 $\epsilon_f = 0.6$ である。

図1は、 $U = 0, 4, 8, 12$ における、particle-particle 型理論を用いて計算した $\chi_s(q)$ を示している。我々の計算は、有限温度で行なっているので、 $\chi_s(q)$ は $q \sim 2k_f$ でやや構造がなまっている。 $\chi_s(q)$ は、相互作用 U を大きくしていても、RPA の結果と同様に、有限温度の効果を除いて波数領域 $0 \leq q \leq 2k_f$ では一定となっていることがわかる。

そこで、我々はさらに進んで、スピンゆらぎの効果を取り入れた particle-hole 型理論を用いて帯磁率を求めてみることにする。図2は、 $U = 0, 2, 4, 6, 8$ における、particle-hole

型理論を用いて計算した $\chi_s(q)$ の波数依存性を示す。 $U = 0, 2, 4$ のときは、有限温度の効果を除いて波数領域 $0 \leq q \leq 2k_f$ では一定であるが、 $U = 6, 8$ と更に、相互作用が強くなると、 $q = 0$ で最大、即ち強磁性的となることがわかった。

我々は、RPA から計算された $\chi_s(q)$ と particle-hole 型理論から計算した $\chi_s(q)$ を用いて、(1) 式より、フェルミ線上でのスピンゆらぎを媒介とする準粒子間有効相互作用 \hat{V} を求めた。 \hat{V} を部分波展開したとき、 s 波の成分を v_s 、 p 波の成分を v_p 、 d 波の成分を v_d と書く。RPA、particle-hole 型理論のいずれを用いた場合でも、全ての U の値に対して、(1) v_s は斥力であること、(2) 引力のなかで1番大きい成分は v_p か v_d であることがわかった。図3に、 $\frac{v_p}{v_d}$ の U 依存性を示す。RPA から計算された有効相互作用では、 U の大きさにかわらず、 v_d が最大の引力成分となっており、 $\frac{v_p}{v_d}$ はほぼ一定であることがわかった。温度 $T = 0$ では、RPA では引力を生じないが、有限温度の効果によって、 $k \sim 2k_f$ で波数依存性を持つことにより引力の成分を持ったと考えられる。particle-hole 型理論から計算された有効相互作用では、 $U \lesssim 5.0$ では、 v_d が最大の引力成分となっていたが、相互作用が強くなり、 $\chi_s(q)$ が強磁性的となるに従って (図2)、 v_p が最大の引力成分となっていることがわかった。

本研究では、帯磁率に対する相関効果を議論したが、有効相互作用を議論する際には、この研究会でも大西によって指摘されているように [5] 振動数依存性、波数依存性を考慮することが重要である。両方の効果を同時に考慮した研究が必要である。

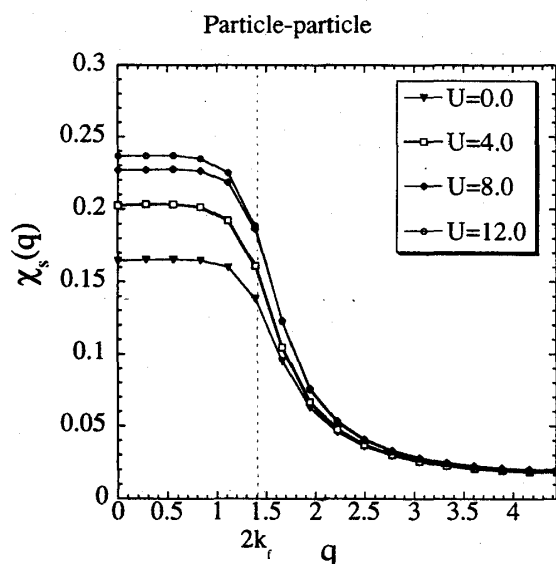


図1 particle-particle 型理論を用いて計算された静的帯磁率の波数依存性。

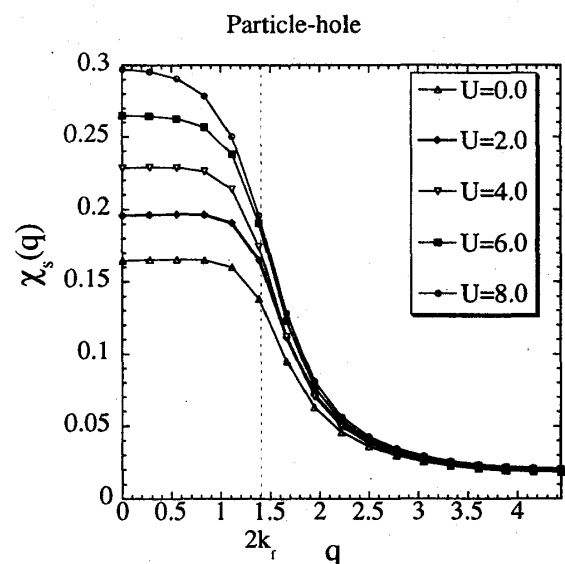


図2 particle-hole 型理論を用いて計算された静的帯磁率の波数依存性。

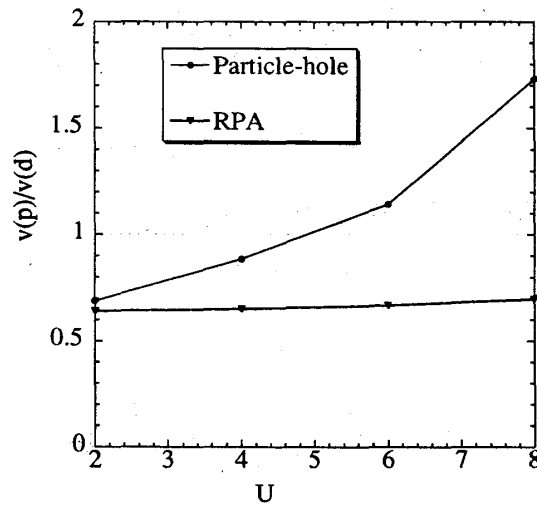


図3 particle-hole 型理論と RPA を用いて計算された準粒子間有効相互作用の p 波と d 波の成分の比。

参考文献

- [1] 例えば、S. Nakajima : Prog. Theor. Phys. **50** , 1101 (1973).
- [2] G. Baym and L. P. Kadanoff : Phys. Rev. **124** , 287 (1961).
- [3] N. E. Bickers and D. J. Scalapino : Annals of physics. **193** , 206-251 (1989).
- [4] L. G. Aslamosav and A. I. Larkin : Phys. Lett. **26A** , 238 (1968).
- [5] 大西祥史：2次元超伝導のパラマグノン機構、研究会 スピン3重項超伝導をめぐって